第38卷 第3期
2021年5月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 3
May 2021

近59 a锡林郭勒草原旱灾驱动气候因子分析

赵水霞[1]， 王文君[1]， 吴英杰[1]， 全 强[1]， 王思楠[2]， 陈晓俊[1]， 刘铁军[1]

（1. 中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010020；
2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘 要： 锡林郭勒草原是我国北方典型的干旱半干旱牧区，利用1959—2017年研究区不同地理位置逐日气温和降水数据，通过计算潜在蒸散量和水分盈亏量，结合趋势分析和R/S极差分析等方法，研究干旱半干旱牧区气候因子的时空分布特征及变化趋势，为北方牧区干旱的监测和预测提供科学支撑。研究表明：过去59 a，锡林郭勒草原气温呈显著增加趋势[0.39 ℃·(10a)$^{-1}$]，降水呈缓慢减小趋势[−5.40 mm·(10a)$^{-1}$]，气候逐渐趋于暖干化。研究区东南部的降雨量明显高于西北部，水分亏缺量由西向东逐渐递减，气温和潜在蒸散量则呈西南高、东北低的空间分布；不同地理位置关键致灾气候因子的年际变化差异显著，年内呈单峰型周期性变化，于7月份达到水热条件良好状态。锡林郭勒草原暖干化趋势的正持续性强烈，西部二连浩特地区荒漠化风险严重，东部西乌珠穆沁旗和中北部那仁宝力格地区降雨和水分盈亏量下降趋势显著，会对植被生长和生态环境产生不利影响。

关键词： 干旱半干旱牧区；锡林郭勒草原；气候因子；时空特征；演化趋势

全球气候持续变暖加剧了极端干旱等气象灾害事件的发生风险，而农牧业又是干旱灾害风险的主要承灾对象[1-2]。我国作为农牧业大国，其农业生产和社会经济等对气候条件的依赖性很强，而频发的干旱事件严重威胁着中国的粮食和生态安全，使得摸清气候的变化特征及旱灾的驱动因子对防旱减灾具有重要意义。降雨和气温是气候变化的关键要素和农牧业发展的气候基础，气温持续升高和降雨有效性降低是干旱发生的主要原因，两者水热耦合作用又直接影响区域蒸散发和水分盈亏量变化，进而间接反映土壤相对湿度及植被受水分胁迫状况[3-5]。据《中国气候变化蓝皮书(2020)》[6]，我国1951—2019年年平均增温速度显著高于同期全球平均水平，为0.24 ℃·(10a)$^{-1}$，北方地区的增温速度相对显著[7-8]，不同地理位置区域降雨量受季风、地形条件及人类活动等影响变化趋势各异。内蒙古锡林郭勒草原是我国北方重要的生态屏障，也是典型的干旱半干旱牧区，近年来受气候变化加剧及极端天气频发的影响，牧区干旱灾害日趋严重，生态环境也出现恶化的趋势，严重影响和制约草原生产力和生物多样性[9-10]。为有效防治干旱灾害，保护生态环境良好发展，从引起旱灾发生的气候因子出发，开展关键致灾因子(降雨、气温、潜在蒸散量和水分盈亏量)的时空变化特征及其演化趋势研究具有重要科学意义和现实价值。

Huang等[11]综述了我国半干旱区气候变化的最新研究进展，发现1994—2008年间，半干旱区面积相比1948—1962年增加了33%，且半干旱区气候变化受地-气耦合作用及人类活动的共同影响，未来还具有荒漠化的风险。Liu等[12]以气温、降雨和旱涝等为主要研究变量，探究了气候驱动下干旱对社会不稳定性的影响。Wang等[13]基于淮河流域的气候要素及其变化特征，分析了干旱的发展趋势，揭示了降雨偏少和气温偏高是旱情发生的主要因素。潜在蒸散量是热量和水量平衡的重要组成部分，我国干旱半干旱地区东西部潜在蒸散量差异显著，总体呈现东部增加，西北部减少的特征[14]。水分盈亏量和干燥度等均可用于气候干湿状况判定，

收稿日期： 2020-11-18； **修订日期：** 2020-12-28
基金项目： 内蒙古自治区科技计划重点项目和重大专项(201802123，2020ZD0020-2)；中国水科院基本科研专项(MK2020J12，MK2020J11)；国家自然科学基金项目(52009084，51779156)；内蒙古自治区自然科学基金(2020BS05038，2017BS0512)
作者简介： 赵水霞(1992-)，女，博士，主要从事干旱区水文气象的研究. E-mail: zhaoshuixia2010@163.com
通讯作者： 吴英杰. E-mail: 508188330@qq.com

我国1961—2020年的多年平均水分盈亏量为负值，水分条件为亏缺，空间分布从南向西北呈盈余递减趋势[15]，且西北地区的水分盈亏量变化存在3.5~5 a的主周期[16]。内蒙古地区位于我国北方，气候暖干化趋势明显，1960—2016年全区的气温增长达到0.38 ℃·(10a)$^{-1}$，冬、春季气温升高对年均气温上升的贡献率最大；全区降雨变异性强且极端干旱事件频发，雨季降雨量的空间减少趋势呈现东部>中部>西部的特点[17-18]。学者们对我国北方锡林郭勒草原气候变化的研究已积累了一定成果，方法多采用线性回归等数理统计方法，研究对象也多集中在气温、降雨量及极端天气变化等方面，缺乏小尺度不同类型草原关键气候因子的时空分布特征研究，难以对内蒙古干旱半干旱牧区气候变化特点形成完整认识[19-21]。

鉴于上述研究背景，本文以内蒙古锡林郭勒草原为研究区，通过筛选气温、降雨、潜在蒸散量和水分盈亏量四个关键致灾气候因子，采用数理统计、倾斜率趋势分析和R/S极差分析等方法，探究不同地理位置小尺度气候的空间分布差异及年际年内变化特征；采用Hurst指数对气候因子的演化趋势进行分析和讨论，以期探明锡林郭勒草原的干旱化风险及其对气候因子变化的响应，为干旱半干旱牧区旱情监测及生态环境保护提供科学支撑，也为气温和降水变化的短期预警提供依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒草原位于内蒙古自治区中部，地理位置为111°08′~120°07′E，41°35′~46°40′N，是中国四大天然牧场之一，也是我国典型的温带大陆草原。研究区地处中纬度西风带，气候类型属于中温带干旱、半干旱大陆性季风气候，具有高寒、多风、少雨和降雨变率大、空间分布不均等特点。地势由东南向西北倾斜，海拔在800~1200 m，东南多为低山丘陵，西北则地势平坦，一定程度上影响了区域光照和水汽循环特征。区域地表水资源较少，主要集中在东部和东南部，土壤类型以风沙土为主，部分地区有栗钙土和草甸土。受研究区气候特点及地形地势等综合影响，锡林郭勒草原上共布设9个国家气象定位监测站，站点数据涵盖了东部草甸草原、中部典型草原和西部荒漠草原等不同草原类型，地理位置及气象站点分布如图1所示。

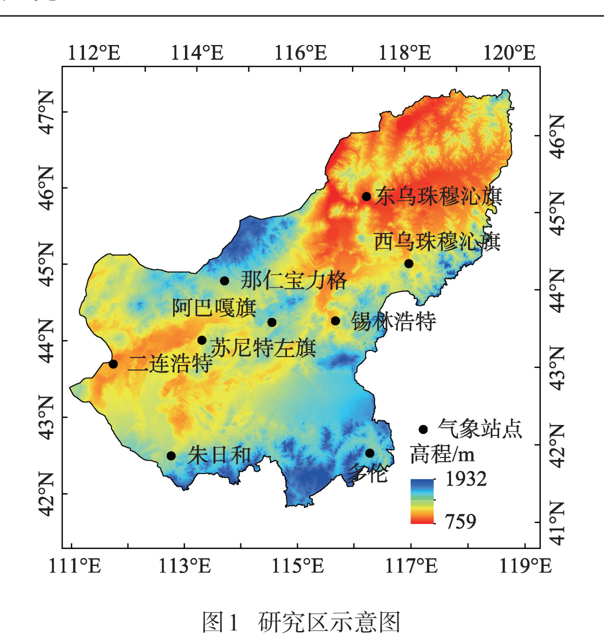


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

1.2 研究方法

本研究1959—2017年日均气温、降雨量、风速和日照时数等气象数据来源于国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn/)。采用数理统计和线性回归等方法，对研究区年际和年内气温、降雨、潜在蒸散量和水分盈亏量的时间序列变化趋势进行分析。其中，潜在蒸散量采用彭曼(Penman-Monteith)公式进行计算[22]，水分盈亏量为区域降雨量与同期潜在蒸散量的差值，差值的大小反映了水分盈亏程度及气候的干湿状况。水分盈亏量大于0 mm时，水分有盈余，表示气候湿润；小于0 mm时，水分处于亏缺状态，表明气候干燥；等于0 mm时，表示水分收支平衡[23]。

1.2.1 潜在蒸散量(ET_0) 采用FAO推荐的Penman-Monteith公式计算锡林郭勒草原逐日潜在蒸散量，再进行年际和年内统计。该模型因其物理意义鲜明和计算精确，为学者们广泛应用[22]。计算公式如下：

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \quad (1)$$

式中：ET_0为潜在蒸散量(mm·d^{-1})；Δ为饱和水汽压曲线斜率(kPa·℃$^{-1}$)；R_n为地表净辐射，是收入的短波辐射和支出的净长波辐射之差(MJ·m^{-2}·d^{-1})；γ为干湿常数(kPa·℃$^{-1}$)；U_2为地面以上2 m处风速(m·s^{-1})；e_a为实际水汽压(kPa)；e_s为平均饱和水汽压(kPa)；T为平均气温(℃)。

太阳短波辐射R_s如公式2所示。

$$R_s=\left(a_s+b_s\frac{n}{N}\right)R_a \tag{2}$$

式中：R_a为天文辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1})；n为实际日照时数(h)；N为最大可能日照时数(h)；a_s和b_s为回归系数，采用FAO的推荐值a_s=0.25、b_s=0.50。

1.2.2　重标极差分析法　采用重标极差分析法(Rescaled Range Analysis，R/S)对气候因子演化趋势进行探讨，该方法具有长期记忆效应，可以识别高峰厚尾的非高斯过程，对无限方差的随机过程几乎处处收敛[24]。通过获取连续气候资料的Hurst指数，定量描述一组数据随时间序列的变化趋势，进而判定气候因子未来变化的持续性规律及持续性强弱程度，对气候变化趋势做出科学预测。计算方法如下：

设有时间序列$x(t)$，t=1，2，…，n，定义均值序列：

$$y_t=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}x(t) \tag{3}$$

计算累积离差：

$$F(t,n)=\sum_{t=1}^{n}\left(x(t)-y_t\right),\ (1\leqslant t\leqslant n) \tag{4}$$

极差序列：

$$R(n)=\max F(t,n)-\min F(t,n) \tag{5}$$

标准差序列：

$$S(n)=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(x(t)-y_t\right)^2} \tag{6}$$

Hurst指数：

$$\frac{R(n)}{S(n)}=C\times n^H \tag{7}$$

式中：H为Hurst指数，可以在双对数坐标系中用最小二乘法拟合求得。当H=0.5时，时间序列变化趋势是随机的，不存在长期相关性；当$0<H<0.5$时，说明时间序列未来的变化趋势与过去相反，即反持续性；当$0.5<H<1$时，未来时间序列变化趋势与过去保持一致，H越接近1，变化趋势的正持续性越强。

2　气候因子的时空特征

2.1　气候因子的空间分布特征

全球变暖直观反映在气温变化上，研究区受地形地貌及大气环流等影响，对气候变化的响应程度也不一致。计算锡林郭勒草原不同地理位置1959—2017年各气候因子多年平均值，在ArcGIS空间分析系统支撑下，采用克里金(Kriging)插值方法对气候因子空间分布进行插值(图2)。锡林郭勒草原降雨量和水分盈亏量、气温和潜在蒸散量分别呈现良好的一致性，东南地区降雨量和水分盈亏量显著高于西北地区，而气温和潜在蒸散量呈现由东向西逐渐增大的趋势。

水分盈亏量大小反映了水分盈亏程度及气候的干湿状况，气候干湿变化又进一步影响草原植被及生态环境。研究区属于典型的干旱半干旱牧区，水分盈亏量均在0 mm以下，其值越大，说明水分亏缺量越小。以中部锡林浩特为界，研究区各气候因子空间分布呈现条带状的东西差异，位于东部西乌珠穆沁旗和东南多伦地区的多年平均降雨量均在330 mm以上，年水分亏缺量小于670 mm，年均气温适中，为典型的草甸草原气候区；西部二连浩特、苏尼特左旗和朱日和年平均降雨量不足220 mm，多年平均气温、潜在蒸散量显著高于全盟平均水平，年水分亏缺量大于1000 mm以上，形成了独特的荒漠化气候特征区，干旱风险度高；东乌珠穆沁旗、那仁宝力格、锡林浩特和阿巴嘎旗的气候因子介于上述气候特征区之间，属于典型草原气候区，且中北部那仁宝力格地区的多年平均气温为全盟最低，为0.9 ℃。

2.2　气候因子的年际年内特征

2.2.1　气候因子的年际变化特征　从锡林郭勒草原1959—2017年各气候因子区域均值的年际变化特征可以看出(图3)，降雨和水分盈亏量的斜率均为负值，变化趋势呈缓慢下降特征，而气温和潜在蒸散量均呈上升趋势。降雨是干旱半干旱区重要的水分来源，也是引起旱灾发生的直接气候因子，1959年以来，锡林郭勒草原多年平均降雨量为248.70 mm，年降雨量递减度为−5.40 mm·(10a)$^{-1}$，气温增长水平为0.39 ℃·(10a)$^{-1}$，同全区1960—2016年气温增长水平相当。潜在蒸散量的变化受气温、风速及日照时数等多因素影响，而水分盈亏量变化主要与降雨补给量和潜在蒸散量耗损有关，研究区1959—2017年潜在蒸散量增长幅度和水分盈亏量下降幅度分别为6.80 mm·(10a)$^{-1}$和−12.20 mm·(10a)$^{-1}$。

受区域地形地貌及大气环流特征等影响，不同地理位置各气候因子的分配格局和年际变化趋势不一，从锡林郭勒草原1959—2017年各气候因子年际变化特征可以看出(图4)，降雨、气温、潜在蒸散量和水分盈亏量的年际变化范围分别为−9.3~−1.8 mm·(10a)$^{-1}$、0.26~0.45 ℃·(10a)$^{-1}$、−2.1~22.8 mm·

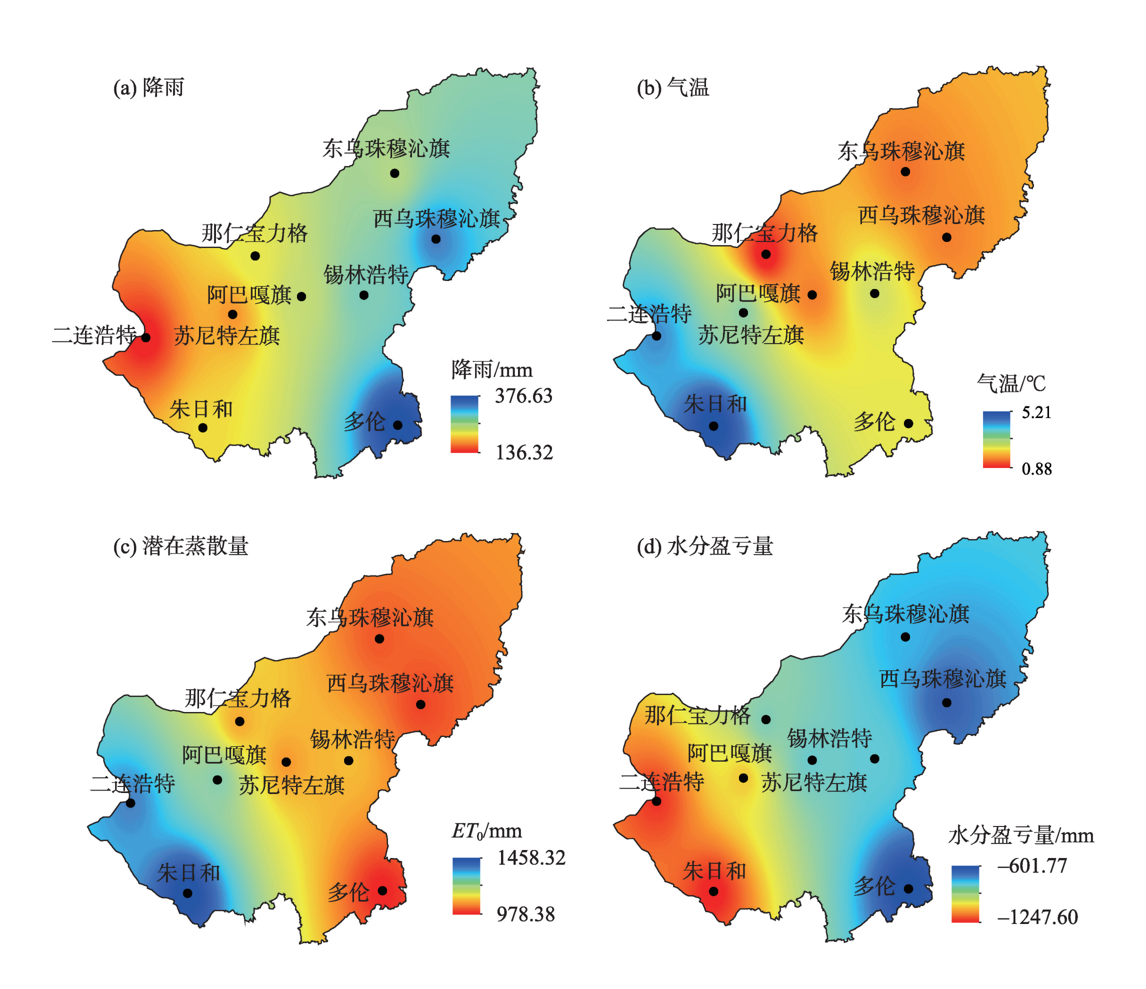


图2 气候因子的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of climatic factors

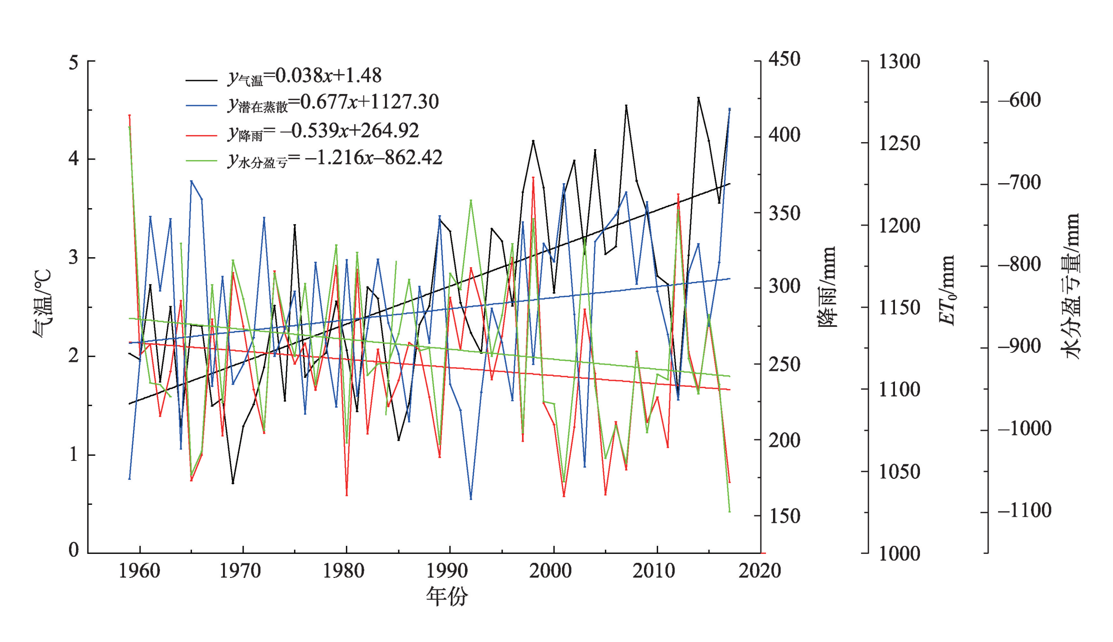


图3 锡林郭勒草原气候因子的年际变化趋势

Fig. 3 Inter-annual characteristics of climatic factors in Xilin Gol grassland

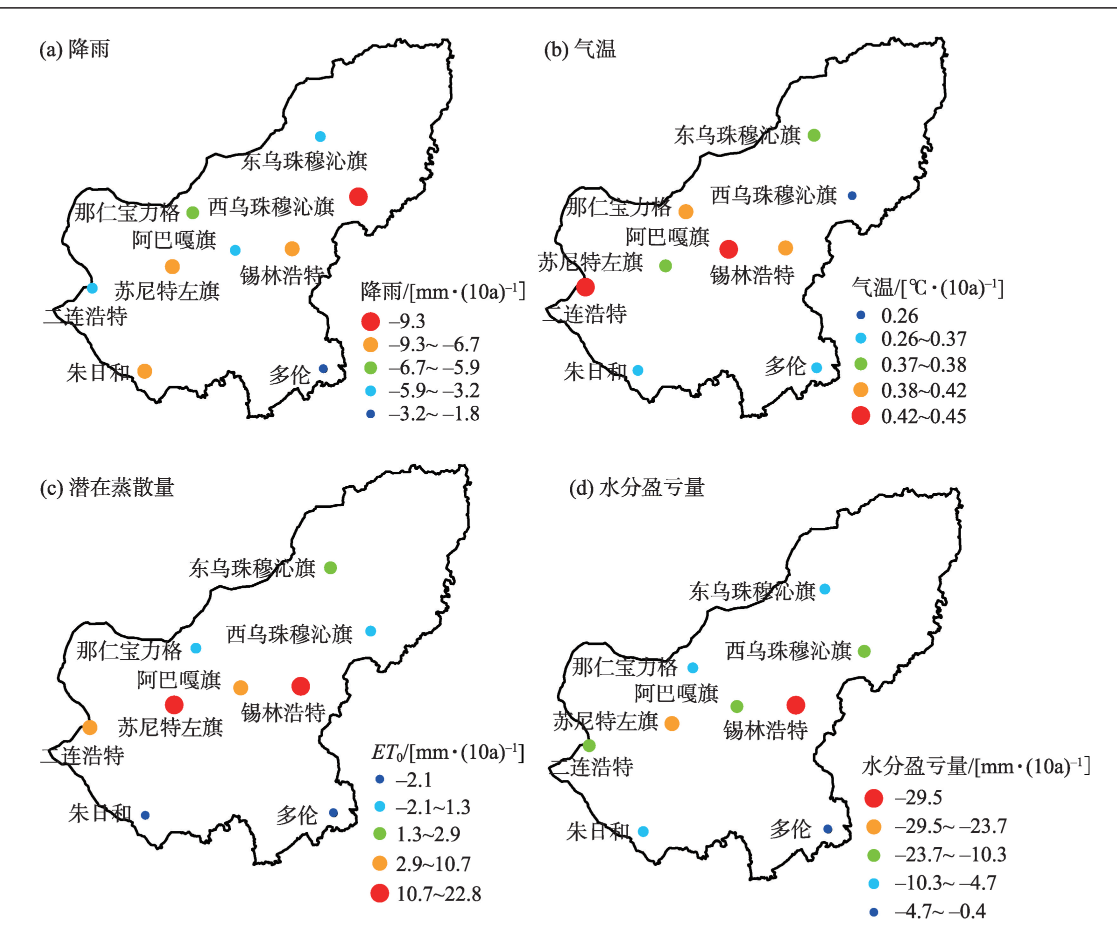


图4　1959—2017年锡林郭勒草原气候因子的年际变化分布特征

Fig. 4　Distribution characteristics of inter-annual variation of climatic factors in Xilin Gol grassland from 1959 to 2017

$(10a)^{-1}$、-29.5~-0.4 mm·$(10a)^{-1}$。

降雨持续下降加快了草地荒漠化和干旱化进程,增大了旱灾的发生风险。锡林郭勒草原区域年平均降雨量最低值出现在2001年,为162.3 mm,2001年西部二连浩特的年降雨量为区域最小,总量不足40 mm。分析不同气候因子的年际增、减幅度发现,降雨减幅较高的地区出现在东部西乌珠穆沁旗[-9.3 mm·$(10a)^{-1}$]、中部锡林浩特[-6.7 mm·$(10a)^{-1}$]、西部苏尼特左旗[-7.2 mm·$(10a)^{-1}$]和西南部的朱日和[-6.8 mm·$(10a)^{-1}$],这些地区的降雨变化幅度显著高于全盟平均水平,东南多伦地区的降雨减幅较小,仅为-1.8 mm·$(10a)^{-1}$。研究区气温增幅较高的地区集中在西部二连浩特和中部阿巴嘎旗,为0.45 ℃·$(10a)^{-1}$,增幅较低的地区出现在东部西乌珠穆沁旗,该区气温增幅接近全国平均水平,为0.24 ℃·$(10a)^{-1}$。

气温的持续升高导致水分蒸散量加大,干旱程度加重,研究区2014年虽为年平均气温最高的一年,但受水热协同耦合作用影响,锡林郭勒草原年均潜在蒸散量和水分亏缺量极大值均发生在2017年,为典型的气候干燥年。1959—2017年,锡林郭勒草原潜在蒸散量年际增幅较大的地区主要集中在中西部,且中部锡林浩特增幅速度为全盟最高水平,达到22.8 mm·$(10a)^{-1}$;中部阿巴嘎旗和西部苏尼特左旗的增幅水平同样显著,均大于10.7 mm·$(10a)^{-1}$。潜在蒸散量的变化受气温、风速和水气压差等多种因素影响[14],东南多伦和西南朱日和地区风速和相对湿度的显著下降,使得潜在蒸散量变化呈一定的减小趋势,但受平原区降雨量较小,水分亏缺量较大的影响,朱日和地区的旱情依然严峻。中部锡林浩特受潜在蒸散量显著增加的影响,水分亏缺量逐渐增加,其增加幅度远大于全盟平均水平,为-29.5 mm·$(10a)^{-1}$,一定程度上加快了锡林浩特地区的干旱化进程。

2.2.2　气候因子的年内变化特征　从不同地理位置1959—2017年气候因子的年内变化特征(图5)可以看出,各气候因子近乎呈单峰型周期性变化,研究区降雨和气温于4月开始显著上升,于7月达到年

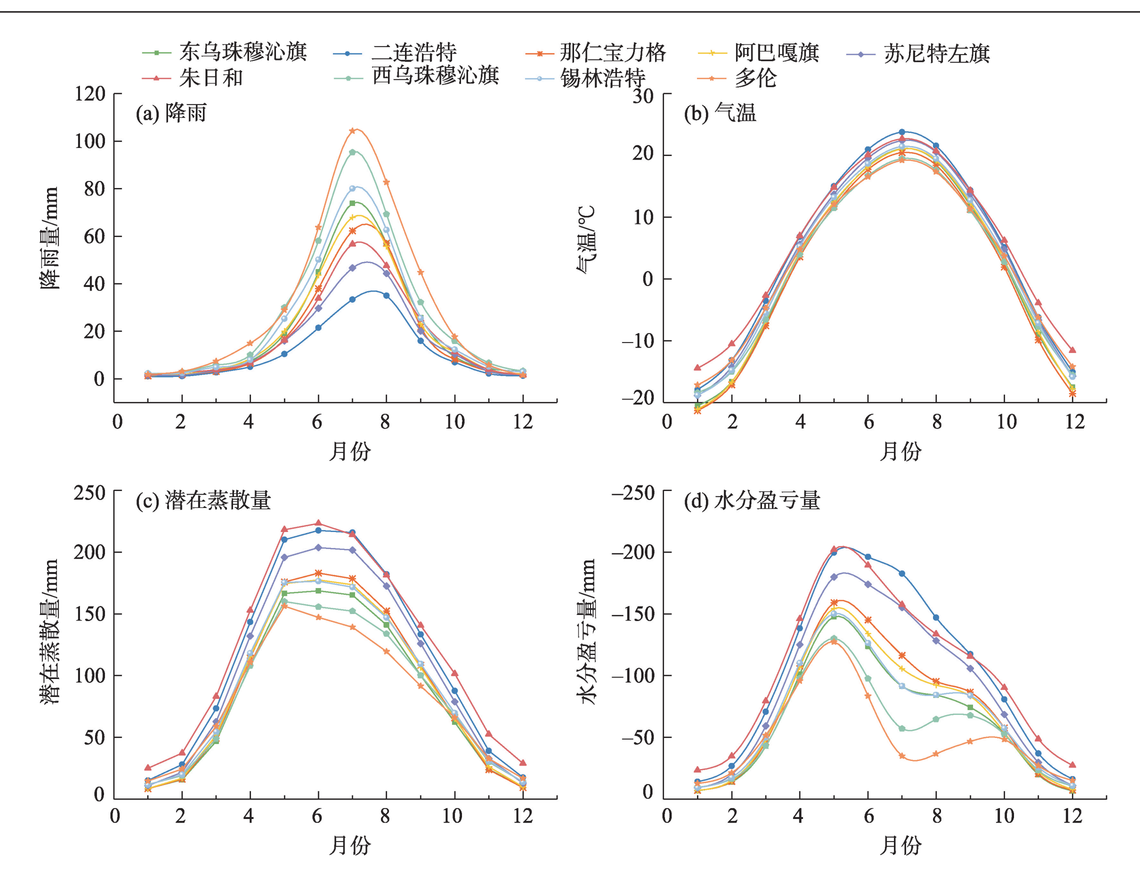


图5 1959—2017锡林郭勒草原气候因子多年平均年内变化特征

Fig. 5 Annual variation characteristics of climate factors in Xilin Gol grassland from 1959 to 2017

内峰值,期间区域供水相对充足,日照时数长,水分亏缺量较小,植被生长旺盛。潜在蒸散量的年内峰值出现在6月,其原因在于6—9月雨季降雨量充足,空气湿度大,一定程度上限制了蒸散速率,且6月和7月的蒸散量差异较小。1—4月和10—12月是气候因子变化的低值区,而水分条件又是影响植被生长期长短的关键因素,受不同地理位置气候条件影响,草地进入返青期后于5月达到水分的严重亏缺状态。

从图5不同站点气候因子年内变化特征可以看出,锡林郭勒草原汛期6—9月降雨量集中且降雨集中度呈现由西向东逐渐增强的趋势,东南多伦地区属于低山丘陵区,年内最大降雨量达到103.6 mm,而西部二连浩特地势平坦,年内降雨量仅为多伦地区的1/3,符合山丘降雨量大,平原区降雨量小的一般规律。不同地理位置气温的年内差异相对较小,7月西部二连浩特和东南多伦地区的气温差异小于5 ℃。位于草甸草原气候区的多伦和西乌珠穆沁旗年内潜在蒸散量变化趋势与其他站点相似,但水分盈亏量指标在5—7月下降明显;西部二连浩特、苏尼特左旗和朱日和的年内水分盈亏量变化差异较小,且二连浩特是荒漠草原气候区中水分亏缺量最大的地区。

3 气候因子的变化趋势

锡林郭勒草原近59 a气候因子的Hurst指数如图6所示,不同区域各气候因子的Hurst指数均介于0.5~1.0之间,说明时间序列的变化均具有正持续

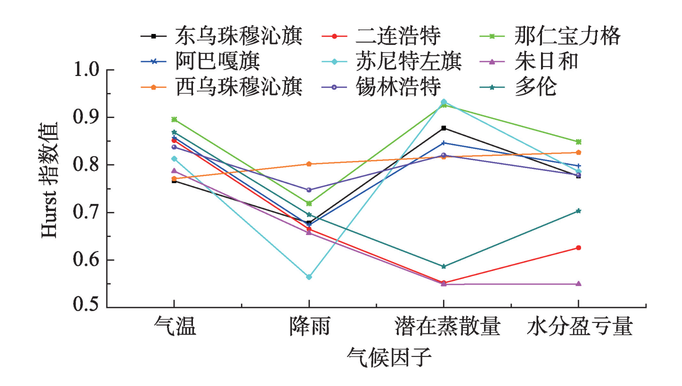


图6 锡林郭勒草原各站点气候因子的Hurst指数变化

Fig. 6 Variation of Hurst index of climate factors at meteorological stations in Xilin Gol grassland

性。其中，降雨和水分盈亏量仍将呈减小的变化趋势，而气温和潜在蒸散量将持续上升，且气温上升的Hurst指数均介于0.77~0.90之间，正持续性强烈。

相比较而言，西乌珠穆沁旗降雨量下降的正持续性明显高于其他站点，苏尼特左旗降雨量下降趋势虽相对较小，但其潜在蒸散量*H*值达到0.93，为强正持续性，潜在蒸散量的持续增大，一定程度上造成水分亏缺量增大，导致干旱半干旱地区植被生长受到抑制。朱日和虽属于荒漠草原气候区，降雨量相对较小，但其潜在蒸散量持续性的减小及水分盈亏量相对缓慢的增长速度，有利于当地旱情的缓减。中北部那仁宝力格各气候因子的正持续性均比较突出，未来暖干化趋势显著。

4 讨 论

锡林郭勒草原是对气候变化响应极为敏感的干旱半干旱区，受特殊的地理位置、地形地貌特征，复杂的下垫面条件及大尺度环流等自然因素和人类活动等因素影响，研究区气温和降雨分别呈现不同程度的增加和降低，且南方涛动和厄尔尼诺现象对气候突变也具有一定影响[25]。潜在蒸散量的大小揭示了气候变化下不同下垫面条件的蒸散能力，1959—2017年间，锡林郭勒草原多数地区的潜在蒸散量受气温升高、水汽压差增大等因素影响而呈增加的变化趋势，这与全球和中国整体的变化趋势不太一致，其原因主要与“蒸发悖论”有关，全球尺度下，大气中的云量和气溶胶增加，导致地表太阳辐射量减少、气温日较差和水汽压差变弱，进而引发蒸散量减少[21,26]。潜在蒸散量和降雨量是水分平衡和能量平衡的主要控制因子，研究区降雨量缓慢下降和潜在蒸散量持续上升造成的水分亏缺量增大，气候干燥度增加，会对草地生物量、生产力、生物多样性及生态环境等产生非常不利的作用。

全球变暖背景下，锡林郭勒草原关键致灾气候因子的正持续性将加快草原干旱化和荒漠化进程，进而造成草地退化、农牧业减产和生产效益降低，严重时制约生态系统的可持续发展及引发火灾和虫灾等一些次生灾害[27]。锡林郭勒草原不同地理位置的暖干化风险差异较大，位于不同降雨等值线区域的草地对气候因子响应程度也不尽相同，其中，典型草原和荒漠草原受降雨量的控制明显，而水分相对充足的草甸草原对水热因子的敏感性主要集中在温度变化[28]。同属于荒漠化草原气候特征区的二连浩特相比朱日和、苏尼特左旗而言，降雨量最少，且未来降雨量下降和气温升高的正持续性较大，暖干化趋势突出，而朱日和潜在蒸散量虽远大于降雨补给量，水分亏缺量较大，但潜在蒸散量的持续性减少将有利于减缓当地的旱情。那仁宝力格属于典型草原气候中降雨和气温正持续性相对较强的区域，该站多年平均降雨量较小，气温较低，具有干旱化风险。位于草甸草原气候区的西乌珠穆沁旗气温升幅相对较弱，降雨量下降趋势显著，一定程度对草地生长产生抑制作用，而多伦地区潜在蒸散量持续下降，降雨量和水分盈亏量充足，气候相对湿润，生态环境良好。本研究基于不同类型草原旱灾驱动气候因子变化特征，揭示了同等气候区划下生态系统的相对脆弱程度，为牧区防旱减灾提供了理论依据。

5 结 论

通过分析典型干旱半干旱牧区锡林郭勒草原1959—2017年降雨、气温、潜在蒸散量和水分盈亏量的变化特征及趋势，主要得出以下结论：

(1) 锡林郭勒草原旱灾驱动气候因子呈明显的东西条带状差异，受地形条件等影响，水分盈亏量判定的气候湿润度呈现由东南向西北逐渐减小的空间分布格局。

(2) 1959年以来，锡林郭勒草原气候整体趋于暖干化，表现为气温显著升高和降雨量缓慢下降，平均变化幅度分别为0.39 ℃·$(10a)^{-1}$和−5.40 mm·$(10a)^{-1}$；旱灾驱动气候因子年内呈单峰型周期性变化，气温和降雨在7月达到峰值，潜在蒸散量和水分亏缺量分别在6月和5月达到峰值，1—4月和10—12月是气候因子变化的低值区，7月的水热条件为植被生长提供了良好环境。

(3) 锡林郭勒草原未来气候的暖干化趋势仍将持续，基于东西部气候因子的时空变化潜力及复杂下垫面对水分的需求能力，判定西部二连浩特未来暖干化风险相对较高，荒漠化趋势严重，东部西乌珠穆沁旗虽属于草甸草原气候区，但强烈的降雨减幅将增大区域潜在干旱化风险。

(4) 不同类型草原对气候因子的响应程度差异较大，本研究基于关键致灾气候因子分析了旱灾发生的潜在风险，未来要对不同类型草原旱情进行监

测和预测时，还需综合考虑下垫面条件、植被类型及水文特征等因素。

参考文献（References）：

[1] IPCC. Climate change 2013: Managing the Risks of Extreme Events and Disaster to Advance Climate Change Adaptation[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[2] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century[J]. Science, 2004, 305 (5686): 994–997.

[3] 林婧婧, 张强. 中国气候态变化特征及其对气候变化分析的影响[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1593–1600. [Lin Jingjing, Zhang Qiang. Characteristics of China climate states change and its impact on the analysis of climate change[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(6): 1593–1600.]

[4] 王宏, 李小兵, 李霞, 等. 中国北方草原对气候干旱的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 172–182. [Wang Hong, Li Xiaobing, Li Xia, et al. Grassland response to drought in northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 172–182.]

[5] Niu J M. Impacts prediction of climatic change on distribution and production of grassland in Inner Mongolia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2001, 9(4): 277–282.

[6] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书2020[M]. 北京: 科学出版社, 2020. [China Meteorological Administration. Blue Book on Climate Change in China 2020[M]. Beijing: Science Press, 2020.]

[7] 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951—2010年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6): 887–896. [Han Cuihua, Hao Zhixin, Zhen Jingyun. Regionalization of temperature changes in China and characteristics of temperature in different regions during 1951–2010[J]. Progress in Geography, 2013, 32(6): 887–896.]

[8] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 70(6): 942–956. [Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 70(6): 942–956.]

[9] 曹立国, 刘普幸, 张克新, 等. 锡林郭勒盟草地对气候变化的响应及其空间差异分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 789–794. [Cao Liguo, Liu Puxing, Zhang Kexin, et al. Analysis on response of grasslands to climate change and its spatial difference in Xilin Gol Leagues[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 789–794.]

[10] 孙振蓉, 陈斌, 张学霞. 锡林郭勒盟农牧业干旱风险评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 129–139. [Sun Zhenrong, Chen Bin, Zhang Xuexia. Drought risk assessment of farming and animal husbandry in Xilingole League[J]. Inner Mongolia Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 129–139.]

[11] Huang J P, Ma J R, Guan X D, et al. Progress in semi-arid climate change studies in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(9): 922–937.

[12] Liu Y X, Yan X D. Comparison of regional droughts impacts and social responses in the historical China: A case study of the Han dynasty[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2020, 117: 1–6.

[13] Wang J C, Lin H, Huang J B, et al. Variations of drought tendency, frequency, and characteristics and their responses to climate change under CMIP5 RCP scenarios in Huai River Basin, China [J]. Water, 2019, 11(10): 2174.

[14] 李鹏飞, 孙小明, 赵昕奕. 近50年中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 57–63. [Li Pengfei, Sun Xiaoming, Zhao Xinyi. Analysis of precipitation and potential evapotranspiration in arid and semi-arid area of China in recent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7): 57–63.]

[15] 高歌, 许崇育. 1961—2010年中国十大流域水分盈亏量时空变化特征[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 380–391. [Gao Ge, Xu Chongyu. Characteristics of water surplus and deficit change in 10 major river basins in China during 1961–2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(3): 380–391.]

[16] 姚晓军, 张晓, 孙美平, 等. 1960—2010年中国西北地区水分盈亏量时空特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 607–616. [Yao Xiaojun, Zhang Xiao, Sun Meiping, et al. Spatial-temporal characteristics of water deficit in Northwest China from 1960 to 2010[J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 607–616.]

[17] 韩芳, 刘朋涛, 牛建明, 等. 50a来内蒙古荒漠草原气候干燥度的空间分布及其演变特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 449–456. [Han Fang, Liu Pengtao, Niu Jianming, et al. Spatial distribution and evolution of climatic aridity in desert steppe in Inner Mongolia in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 449–456.]

[18] 马梓策, 于红博, 张巧凤, 等. 内蒙古地区1960—2016年气温和降水特征及突变[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 114–121. [Ma Zice, Yu Hongbo, Zhang Qiaofeng, et al. Characteristics and abrupt change of temperature and precipitation in Inner Mongolia area over the period 1960–2016[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 114–121.]

[19] 辛志远, 史激光, 刘雅琴, 等. 锡林郭勒地区降水时空分布特征及变化趋势[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2): 312–316. [Xin Zhiyuan, Shi Jiguang, Liu Yaqin, et al. The trend and the temporal-spatial distribution features of precipitation in Xilingol area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(2): 312–316.]

[20] 佟斯琴, 刘桂香, 武娜. 1961—2010年锡林郭勒盟气温和降水时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 340–351. [Tong Siqin, Liu Guixiang, Wu Na. Temporal-spatial changes of temperature and precipitation in Xilingol League from 1961 to 2010[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 340–351.]

[21] 曹艳萍, 庞营军, 庞肖杰. 1956—2017年锡林郭勒盟气候变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 284–290. [Cao Yanping, Pang Yingjun, Pang Xiaojie. The characteristics of climate change in Xilingol League from 1956 to 2017[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 284–290.]

[22] 董煜, 海米提·依米提. 1961—2013年新疆潜在蒸散量变化特

征及趋势[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 153−161. [Dong Yu, Haimiti Yimiti. Spatio-temporal variability and trend of potential evapotranspiration in Xinjiang from 1961 to 2013[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 153−161.]

[23] 徐冬平, 卜金洋, 杨军辉. 黄河流域水分盈亏量时空变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 739−746. [Xu Dongping, Bu Jinyang, Yang Junhui. Spatiotemporal change of water budget and its affecting factors in the Yellow River Basin[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 739−746.]

[24] 聂宁, 张万昌, 邓财. 雅鲁藏布江流域1978—2009年气候时空变化及未来趋势研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 64−71. [Nie Ning, Zhang Wanchang, Deng Cai. Spatial and temporal climate variations from 1978 to 2009 and their trend projection over the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 64−71.]

[25] 尤莉, 程玉琴, 李卉, 等. 1961—2012年6—8月内蒙古降水异常及环流特征分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 56−62. [You Li, Cheng Yuqin, Li Hui, et al. Abnormal precipitation and its circulation characteristics during June to August from 1961 to 2012 in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(6): 56−62.]

[26] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377(6551): 687−688.

[27] Mark J, Hovenden Paul C D, Newton M P. Elevated CO_2 and warming effects on grassland plant mortality are determined by the timing of rainfall[J]. Annals of Botany, 2017, 119(7): 1225−1233.

[28] 张清雨, 吴绍洪, 赵东升, 等. 内蒙古草地生长季植被变化对气候因子的响应[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 754−764. [Zhang Qingyu, Wu Shaohong, Zhao Dongshen, et al. Responses of growing season vegetation changes to climatic factors in Inner Mongolia grassland[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(5): 754−764.]

Analysis of drought-driving climatic factors of Xilin Gol grassland in the past 59 years

ZHAO Shuixia[1], WANG Wenjun[1], WU Yingjie[1], QUAN Qiang[1], WANG Sinan[2], CHEN Xiaojun[1], LIU Tiejun[1]

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 2. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Xilin Gol grassland is a typical arid and semi-arid pastoral area in northern China. The measured daily temperature and precipitation data of nine meteorological stations in Xilin Gol Leagues from 1959 to 2017 were used in this study. By calculating the potential evapotranspiration and water deficit and using trend analysis and the R/S range analysis method, the spatiotemporal variation and its impact on climatic factors in the arid and semi-arid areas were studied. This study provides scientific support for drought monitoring and prediction in northern pastoral areas. Results showed that in the past 59 years, air temperature in Xilin Gol Leagues has increased significantly [0.39 °C·$(10a)^{-1}$], while precipitation decreased [−5.4 mm·$(10a)^{-1}$], and the climate gradually became warm and dry. The precipitation in the southeast of Xilin Gol Leagues is significantly higher than in the northwest. The water deficiency decreased gradually from west to east, and temperature and evapotranspiration in the southwest were higher than in the northeast. The inter-annual variation of key climatic factors (rainfall, temperature, ET_0, and water surplus and deficit) in different geographical locations is significantly different. The variation within a year showed a single peak periodic change. This indicated that the best water and heat conditions are in July. The warm and dry tendency will continue positively in the future, and the risk of desertification in the western Erenhot will be more serious. The precipitation and water deficiency in eastern West Ujimqin Banner and Naren Baolige region, Abaga Banner in the middle and north region will decrease significantly in the future, having adverse effects on vegetation growth and the ecological environment.

Keywords: arid and semi-arid pastoral area; Xilin Gol grassland; climatic factors; spatio-temporal variation; evolution trend